

СТЕРЖНЕВОЙ ЭСГ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ

А. Ф. КАЛГАНОВ, Ю. А. КОРЗЕННИКОВ, А. Ф. КОРОСТЕЛЕВ, Г. В. УНЖАКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры теоретических основ электротехники
и сектора роторных ЭСГ НИИ ЯФЭА)

В соответствии с [1] разработан действующий образец роторного электростатического генератора цилиндрического исполнения со стержневыми транспортерами (ЭСГС). Конструктивно генератор состоит из трех основных элементов, обеспечивающих его функционирование: диэлектрического стаканообразного ротора, в стенках которого вдоль его образующих расположены стержневые металлические транспортеры круглого сечения; внешнего (по отношению к ротору) статора, выполненного заодно с низковольтным фланцем; внутреннего статора, выполненного заодно с высоковольтным фланцем, на котором расположены коммутационные щетки. В предложенной конструкции сводится до минимума число посадочных мест, за счет чего обеспечиваются большая жесткость системы и лучшая соосность ротора и статоров.

Такое конструктивное исполнение стало возможным благодаря использованию в качестве слабопроводящего слоя статоров синтетического материала на основе эпоксидной смолы. Выбор этого материала произведен на основе данных, приведенных в [2].

В выполненном генераторе средний диаметр ротора D составляет 100 мм, толщина стенки ротора — 7 мм, рабочая длина стержней l — 162 мм. Герметизированный блок генератора представляет собой стальную трубу с внутренним диаметром 150 мм, уплотнение которой с одного конца осуществлено стальной крышкой с необходимыми изоляционными вводами низкого напряжения и напряжения возбуждения, а с другой стороны — изоляционной крышкой, совмещенной с выводом высокого напряжения. Обе крышки удерживаются гайками, навинчивающимися на трубу. Рабочей средой генератора является сжатый до 15 атм водород.

Практическое осуществление конструктивной разработки предполагало разработку соответствующей технологии изготовления основных рабочих элементов ЭСГС. Ниже дается краткое описание использованной технологии изготовления ротора и статоров ЭСГС.

Использовались два варианта технологии изготовления ротора.

По первому варианту изготавливался ротор со стальными стержнями сравнительно большого диаметра (1 мм и более). На внешней поверхности изоляционной заготовки, внутренний диаметр и длина которой соответствовали размерам будущего ротора, по образующим выфрезеровывались пазы, в которые затем укладывались стержни. Заготовка со стержнями помещалась и центрировалась внутри формы,

выполненной из антиадгезионного материала (по отношению к эпоксидной смоле). Внутренний диаметр формы определял внешний диаметр ротора. Полость между формой и заготовкой ротора заливалась эпоксидным компаундом. По окончании процесса полимеризации ротор отжигался и выпрессовывался из формы, имея заданные размеры. Чистота наружной поверхности ротора определялась чистотой обработки поверхности формы. Для полной подготовки ротора необходимо было только проторцевать коллекторную часть.

При двухрядном расположении стержней вышеописанная операция повторялась дважды: после закрепления и заливки компаундом первого ряда стержней проводились аналогичные закрепление и заливка второго ряда стержней.

По второму варианту изготавливался ротор с медными проволочными транспортерами. В этом случае предварительно подготавливался полный тонкостенный изоляционный цилиндр. Его стенки (вдоль образующих) обматывались проволокой с соответствующим шагом. Заготовка устанавливалась и центрировалась в цилиндрической форме с двумя коаксиальными стенками. Полость между стенками вместе с заготовкой заливалась эпоксидным компаундом. Последующие операции были аналогичны операциям с ротором со стержнями.

Технология изготовления статоров также была различной соответственно тому, касалось ли это внутреннего или наружного статора.

При изготовлении внутреннего статора подготавливается заготовка в виде цилиндрического изоляционного тела, совмещенного с фланцем. На изоляционном теле закрепляются металлические индукторы. Заготовка с индукторами устанавливается в цилиндрической форме, и полость между заготовкой и внутренней поверхностью формы заливается эпоксидным компаундом специального состава, который после отверждения имеет заданную проводимость, образуя слабопроводящий слой статора. По окончании полимеризации тело статора со слабопроводящим слоем выпрессовывается из формы.

При изготовлении внешнего статора изоляционное тело статора выполняет роль внешней формы. Внутрь этого тела вставляется оправка из антиадгезионного материала, на которой с помощью колец устанавливаются индукторы. Пространство между оправкой и телом статора заливается эпоксидным компаундом. После отверждения компаунда, который становится слабопроводящим слоем статора, оправка выпрессовывается.

Оправки и формы выбираются по размерам такими, что готовые детали имеют заданные размеры и необходимую чистоту поверхности.

На рис. 1 и 2 представлены фотографии статоров и одного из роторов, изготовленных по вышеописанной технологии, и герметизированного блока ЭСГС.

Электрический расчет генератора произведен на основе методики, изложенной в [3]. В связи с тем, что генератор имел двухполюсное исполнение, ожидаемое напряжение выхода, соответственно диаметру ротора, должно было составить 100 кв. В случае обеспечения рабочей напряженности электрического поля (нормальной составляющей) в зазоре ротор — статор в 200 кв/см, близкой к электрической прочности водорода при 15 атм в условиях слабонеровномерного поля, и при коэффициенте заполнения транспортерами диэлектрического тела ротора κ_0 , равном единице, максимальный ток короткого замыкания генератора составлял бы величину

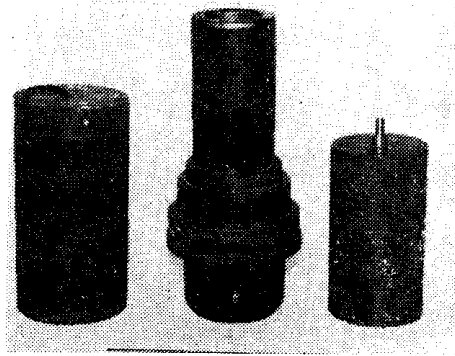
$$I_{к.з.т} = 2\varepsilon_0 E_n 2S_{геом} n = 4\varepsilon_0 E_n \pi D l n = 4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 200 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot 0,162 \cdot \\ \cdot 46,7 = 1,69 \cdot 10^{-3} \text{ а} = 1,69 \text{ ма},$$

где $S_{\text{геом}} = \pi D l$ — рабочая геометрическая поверхность одной стороны ротора ЭСГС;

n — число оборотов ротора в секунду.

Такой ток развивал бы ЭСГ с транспортером-диэлектриком с рабочей поверхностью ротора $S = S_{\text{геом}}$.

В действительности, благодаря наличию транспортеров, величина коэффициента k_0 ЭСГС меньше единицы. Соответственно этому должен быть меньше и ток короткого замыкания. Соответствующие расчеты для различной геометрии системы ротор — статор приведены в табл. 1. Расчеты произведены для случая, когда газовый зазор между роторами и статорами d_1 составляет 0,5 мм. Такая величина



а б в

Рис. 1. Основные рабочие органы ЭСГС: *а* — внешний статор совмещенный с низковольтным фланцем; *б* — внутренний статор, совмещенный с высоковольтным фланцем и проходным изолятором высокого напряжения; *в* — ротор со стержневыми транспортерами

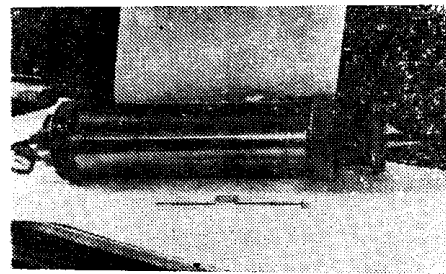


Рис. 2. Общий вид герметизированного блока ЭСГС

зазора была достигнута в выполненном генераторе. Она сравнительно велика, но это объясняется тем, что при расчете необходимых размеров форм, с помощью которых изготавливались статоры и роторы, недостаточно был учтен припуск на усадку эпоксидных компаундов.

Исследовалось четыре варианта роторов: два с двухрядным расположением стержней (А и Б) и два с однорядным (В и Г).

Для большинства роторов коэффициент k_0 значительно меньше единицы. Он наибольший (0,92) для ротора В, имеющего 60 стержней с радиусом 1,5 мм, и наименьший (0,74) для ротора Г, имеющего 45 стержней с радиусом 1 мм. Соответствующее этому различие имеется и в расчетных значениях токов к.з. (см. графу 10).

В графе 11 таблицы приведены измеренные значения токов к.з., а в графе 12 — их процентное отношение к расчетным токам. Это процентное отношение растет от ротора А к ротору Г. Аналогичные этому изменения касаются и достигнутой предельной напряженности электрического поля в зазоре ротор — статор (см. графу 13).

На рис. 3 приведены характеристики к.з., а на рис. 4 — нагрузочные характеристики при $U_{\text{в}} = 25 \text{ кВ}$ для ЭСГС с роторами В и Г.

Интерпретация полученных результатов сводится к следующему:

1. Сравнительно низкое значение коэффициента заполнения k_0 ($= 0,82$) для генератора с ротором А соответствует тому, что ротор несет транспортеры малого радиуса (0,49 мм), имеющие незначительную глубину залегания в диэлектрическом теле ротора (1 мм). В то же время здесь наблюдается наибольшее отклонение измеренного тока от расчетного. По-видимому, вследствие большого числа транспортеров малого радиуса (и, соответственно, вследствие сравнительно малого

расстояния между ними) уже при небольших напряжениях возбуждения за счет большой неравномерности поля в плоскости расположения транспортеров (в том числе и в особенности в области коллекторной

Таблица 1
Электрические и механические параметры вариантов ЭСГС

Параметры ЭСГС	Варианты роторов			
	А	Б	В	Г
1. Расположение транспортеров	Двухрядное	Двухрядное	Однорядное	Однорядное
2. Материал транспортеров	медь	сталь	сталь	сталь
3. Радиус транспортеров, мм	0,49	1	1,5	1
4. Число транспортеров $2m$	82	90	60	45
5. Расстояние между осями транспортеров $a = \frac{\pi D}{2m}$, мм	3,83	3,5	5,24	6,98
6. Изоляционное расстояние между транспортерами $l' = a - 2r$, мм	2,85	1,5	2,24	4,98
7. Глубина залегания транспортеров в теле ротора d_2 , мм	1	1	2	2,5
8. Приведенный зазор $d_{пр} = d_2 + \epsilon r_2 d_1$, мм	3,25	3,25	4,25	4,75
9. κ_0 [3]	0,82	0,853	0,92	0,74
10. $I_{кз_0} = I_{кз_m} \cdot \kappa_0$, ма	1,38	1,44	1,55	1,25
11. $I_{кз_0}$ (измеренное), ма	1,05	1,15	1,35	1,16
12. $I_{кз_0}$ (изм.) / $I_{кз_0}$ · 100, %	76	80	87	93
13. $E'_{пред} = \frac{I_{кз_0} \text{ (изм.)}}{4S_{геомn} \cdot \kappa_0}$	152	160	174	183

Примечание: при расчете данных, приведенных в таблице, использовалось значение относительной диэлектрической проницаемости материала ротора $\epsilon r_2 = 4,5$ (данные наших измерений).

части) возникает электрическое перекрытие между транспортерами в зоне коммутации. В результате наступает преждевременное «насыщение» тока. В этой связи полученное расчетным путем низкое значение $E'_{пред}$ ($= 152$ кв/см) на самом деле еще не является критическим для данных условий. Величина $E'_{пред}$ для этого случая могла бы быть повышена, если бы при прочих разных условиях уменьшить число транспортеров.

2. Некоторое повышение коэффициента κ_0 для ЭСГС с ротором Б по сравнению с ротором А соответствует тому, что ротор здесь имеет транспортеры большего радиуса (1 мм). Однако несмотря на то, что число транспортеров несколько увеличено и расстояния между ними уменьшились, изменение измеренного тока по сравнению с расчетным менее значительно. По-видимому, в этих условиях поле между транспортерами более однородно и это обеспечило достижение большего значения $E'_{пред}$.

3. Высокое значение k_0 для ротора В обязано тому, что ротор несет транспортеры большого размера ($r = 1,5$ мм), которые к тому же имеют значительную глубину залегания (2 мм). Для генератора с этим ротором получено также и большее приближение измеренного тока к з. к расчетному. Однако разница составляет еще значительную величину. По-видимому, уменьшение числа стержней до 60 еще недостаточно для того, чтобы обеспечить необходимую электрическую прочность по поверхности коллектора.

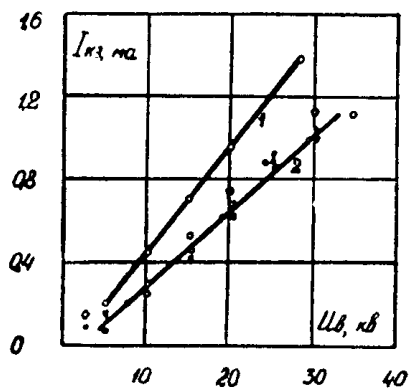


Рис. 3. Характеристики короткого замыкания ЭСГС: 1 — для ротора с $2m = 60$, $r = 1,5$ мм, 2 — для ротора с $2m = 45$, $r = 1$ мм. \triangle — прямой ход; ∇ — обратный ход; \square — прямой ход через 20 минут

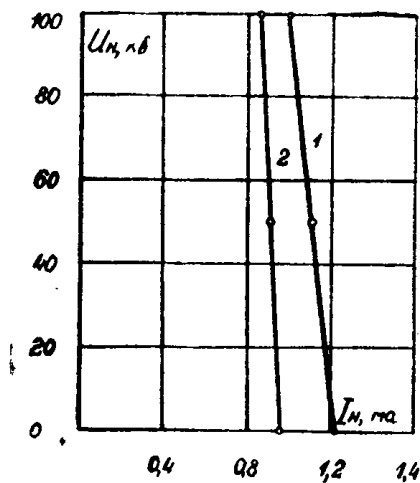


Рис. 4. Нагрузочные характеристики ЭСГС: 1 — для ротора с $2m = 45$, $r = 1$ мм, $U_n = 25$ кВ; 2 — для ротора с $2m = 60$, $r = 1,5$ мм, $U_n = 25$ кВ

4. Генератор с ротором Г имеет наименьшую величину k_0 , поскольку ротор несет малое число транспортеров с $r = 1$ мм. Его расчетный ток к. з., соответственно, также наименьший. Однако измеренное значение тока, а соответственно, и величина $E'_{\text{сред}}$ наиболее близки к расчетному (93%).

Это можно объяснить тем, что за счет увеличения a до ~ 7 мм и l' до ~ 5 мм обеспечиваются условия для поддержания существующей разности потенциалов между транспортерами даже при больших напряжениях возбуждения.

Здесь необходимо отметить, что значения измеренных токов к. з., приведенные в графе 11 для роторов А, Б и В, соответствуют времени первого включения генератора. Однако с течением времени токи уменьшаются, работа генератора становится нестабильной. После разборки генератора каждый раз выяснялось, что во многих местах ротора между стержнями произошли пробой изоляции. Лишь генератор с ротором Г устойчиво работал длительное время. Поэтому несмотря на то, что в соответствии с рис. 3 характеристика короткого замыкания 1 ЭСГС с ротором В лучше характеристик 2 ЭСГС с ротором Г, предпочтение следует отдать генератору, имеющему характеристику 2, поскольку генератор с такой характеристикой является работоспособным, тогда как характеристика 1 получена только для начального времени работы ЭСГС и в дальнейшем не соблюдается.

Сравнение рис. 3 и 4 показывает, что более лучшая характеристика к. з. соответствует более худшей (по наклону) нагрузочной характеристике. Для генератора с ротором Г получен коэффициент увеличения напряжения $k_{\text{н}} \approx 40$. При напряжении в 100 кВ ток нагруз-

ки составляет 760 *мка*. В стабилизированном режиме получено 700 *мка* при 100 *кв*.

Результаты экспериментов, таким образом, подтверждают исходные предпосылки, изложенные в [3]: радиус транспортеров и глубина их залегания в теле ротора не должны быть малыми. Стремление к увеличению числа транспортеров также оказывается неоправданным. ЭСГС может быть работоспособным тогда, когда уровень его тока к.з. значительно отличается от уровня тока ЭСГД в эквивалентных условиях. Иными словами, работоспособным ЭСГС всегда будут соответствовать значения k_0 , значительно меньшие единицы. Однако за счет использования обеих поверхностей ротора ток ЭСГС значительно больше тока ЭСГД равных габаритов. При обеспечении в ЭСГС зазора d_1 порядка 0,3 *мм* (вместо 0,5 *мм*, полученных нами) можно рассчитывать на получение тока нагрузки в 1 *ма* при 100 *кв* в габаритах $D = 100$ *мм* и $l = 150$ *мм*.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Калганов, Ю. А. Корзенников. Авторское свидетельство, № 202291, 1967.
2. Л. А. Коршунова, Р. М. Кессених, А. Ф. Калганов. Труды всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по вопросам создания и методам испытания высоковольтной физической аппаратуры, М., 1969.
3. А. Ф. Калганов. Об энергетическом соотношении между стержневыми ЭСГ и ЭСГ с транспортером-диэлектриком. Настоящий сборник.